

文章编号: 2095-4980(2022)05-0464-06

基于 RCCF-PCT 的机动目标运动参数估计

林 华^{a,b}, 曾 超^a, 张 海^a, 江 舸^a

(中国工程物理研究院 a. 电子工程研究所; b. 研究生院, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对高速机动目标的运动参数估计问题, 基于鲁棒互相关和多项式调频小波变换(RCCF-PCT), 提出了一种高速机动目标运动参数估计方法。该方法首先采用幂率变换增强信号, 利用距离像互相关和鲁棒多项式回归完成距离徙动校正; 再采用多项式调频小波变换对多普勒徙动初步补偿后的信号进行参数化时频分析, 利用提取的时频脊特征完成目标运动参数的精确估计。通过数值实验验证了算法的有效性。

关键词: 鲁棒互相关; 多项式调频小波; 时频表征; 高速机动目标; 运动参数估计

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020141

Maneuvering target motion parameters estimation based on robust cross-correlation and polynomial chirplet transform

LIN Hua^{a,b}, ZENG Chao^a, ZHANG Hai^a, JIANG Ge^a

(a. Institute of Electronic Engineering; b. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Considering the motion parameter estimation problem for a high-speed maneuvering target with complex motions, a novel motion parameter estimation algorithm based on the Robust Cross-Correlation Function(RCCF) and Polynomial Chirplet Transform(PCT), i.e., RCCF-PCT, is proposed. Firstly, after range profile image enhancement using the power-law transformation, the cross-correlation and robust polynomial regression operations are adopted to measure the target's motion parameters, which are used for the preliminary correction of the Range Migration(RM). Then, it employs the PCT to obtain the parameterized Time-Frequency Representation(TFR) of the Doppler Frequency Migration(DFM) coarsely compensated signal, and estimates the residual motion parameters with the time-frequency ridge feature extracted from the TFR. Finally, several numerical experiments are presented to demonstrate the effectiveness.

Keywords: Robust Cross-Correlation Function; Polynomial Chirplet Transform; time-frequency representation; high-speed maneuvering target; motion parameter estimation

高速机动目标不仅运动速度高, 还可能机动变轨或周期跳跃飞行, 其雷达回波存在严重的距离徙动、多普勒展宽与畸变现象^[1-4]。针对该类目标的运动参数测量, 代表性算法主要有 3 类: 第 1 类算法基于散射重心^[5]或距离像间的交叉熵^[6]、相关性^[7]等完成目标运动参数估计, 该类算法简单, 计算量小, 但需要的输入信噪比较高, 参数测量精确度较差; 第 2 类是基于运动参数空间搜索的方法, 如广义 Radon 傅里叶变换(Generalized Radon Fourier Transform, GRFT)^[8]、广义 Keystone 变换—广义 Dechirp 处理(Generalized Keystone Transform and Generalized Dechirp Process, GKT-GDP)^[9]和 Radon-S 变换^[2]等算法, 该类算法参数测量精确度高, 但由于需要对高维运动参数空间进行搜索, 计算量巨大; 第 3 类是以邻近互相关函数法(Adjacent Cross Correlation Function, ACCF)^[10]为代表的迭代算法, 其通过迭代逐次降低运动阶次, 不需要进行运动参数空间搜索, 但需要考虑交叉项干扰的影响。因此, 如果能寻找到一种既不需要高维运动参数空间搜索, 又不存在交叉项干扰, 同时具有较低输入信噪比门限的算法将具有较高应用价值。

本文基于鲁棒互相关和多项式调频小波变换, 提出了一种高速机动目标运动参数估计方法。本方法首先在利用幂率变换算子增强信号的基础上, 利用距离像包络间的相关性测量目标在雷达脉冲间的徙动量, 采用鲁棒多项式回归完成运动参数的粗估计, 完成距离徙动的初步校正; 然后采用多项式调频小波变换对多普勒徙动

初步补偿后的信号进行时频分析，并基于提取的时频脊特征完成目标运动参数的精确估计。

1 算法原理

1.1 信号模型

假设雷达发射线性调频脉冲串信号并照射到一个距离雷达 $R(t)$ 的高速机动目标，其雷达回波经正交解调、脉冲压缩后的信号(即复距离像)可表示为^[11]：

$$s_1(t_m, t') = A_1 \operatorname{sinc} \left[K_r T_p \left(t' - \frac{2\Delta R(t_m)}{c} \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi f_c \Delta R(t_m)}{c} \right] \quad (1)$$

式中： $t_m = mT_r$ 为慢时间， T_r 为脉冲重复周期， $m = 0, 1, \dots, M-1$ ， M 为帧处理时间内脉冲数； $t' = t - mT_r - 2R_c/c$ 为快时间， R_c 为观测场景径向距离中心， c 为电磁波传播速度； $\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ ； A_1, K_r, T_p, f_c 分别为信号幅度、调频斜率、脉冲宽度、载波频率； $\Delta R(t_m) = R(t_m) - R_c$ 为 t_m 时刻目标相对于观测场景中心的径向距离。

1.2 运动参数粗估计与距离徙动初步校正

根据 Weierstrass 定理^[12]，闭区间上任意连续函数可用多项式级数一致逼近。因此在有限观测时间内， $\Delta R(t_m)$ 可近似表示为：

$$\Delta R(t_m) = \sum_{i=0}^Q \frac{1}{i!} a_i t_m^i - R_c \quad (2)$$

式中：多项式阶次 Q 为正整数； a_i 为目标运动参数，如 a_0, a_1, a_2, a_3 分别为目标散射中心相对于雷达的初始径向距离、速度、加速度和加速度变化率等。

距离像包络互相关算法^[13]简单高效，在工程实践中得到广泛应用，但是当输入信噪比低到一定程度时，距离像间的相关性将被破坏，其测量值中将出现大量奇异值点。为此，首先采用幂率变换算子^[14]增强距离像包络 $|s(t_m, t')|$ 中的强信号，并抑制噪声的影响，即 $sp(t_m, t') = |s_1(t_m, t')|^\gamma$ ，其中 γ 为幂因子，具体值可通过实验比较确定，由于不特别关注距离像中的细节纹理， γ 可选择稍大的值，在数值实验部分将给出 $\gamma = 8$ 的实验结果。

其次，选择 $sp(t_m, t')$ 的中间行作为参考距离像 $sp(t_{\text{ref}}, t')$ ，利用各帧距离像与参考距离像的相关性，估计目标在雷达脉冲间徙动量：

$$\Delta \hat{R}(t_m) = \frac{c}{2} \arg \max_{t'} \left\{ \left| IFT_{f_r} \left[FT_{t'}(sp(t_m, t')) FT_{t'}^*(sp(t_{\text{ref}}, t')) \right] \right| \right\}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3)$$

式中： $FT_{t'}(\cdot)$ 为沿快时间 t' 轴向的傅里叶变换； $(\cdot)^*$ 为复共轭操作； $IFT_{f_r}(\cdot)$ 为相对于快时间频率 f_r 的逆傅里叶变换， $\arg \max_{t'}(\cdot)$ 为求解 t' 轴向极大值位置的操作。

然后，基于 $\Delta \hat{R}(t_m)$ ，采用鲁棒多项式回归得到目标运动参数的初步估计值 \hat{a}_i ，构造距离徙动补偿函数 $H_r(t_m, f_r)$ ：

$$H_r(t_m, f_r) = \exp \left[j \frac{4\pi f_r}{c} \sum_{i=1}^Q \frac{1}{i!} \hat{a}_i t_m^i \right] \quad (4)$$

利用 $H_r(t_m, f_r)$ 完成距离徙动校正，可得：

$$s_2(t_m, t') = A_1 \operatorname{sinc} \left[K_r T_p \left(t' - \frac{2}{c} \left(a_0 - R_c + \sum_{i=1}^Q \frac{1}{i!} (a_i - \hat{a}_i) t_m^i \right) \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi f_c \Delta R(t_m)}{c} \right] \quad (5)$$

由式(5)可见，当 $a_i - \hat{a}_i \approx 0$ 时，在不同 t_m 时刻，其包络峰值位于 $2(a_0 - R_c)/c$ 所对应的距离单元内，距离徙动得到校正。

1.3 时频分析与运动参数精确估计

多项式调频小波变换(PCT)^[15-16]作为一种参数化时频分析方法,其本质是采用多项式函数逼近信号真实的时频特征,其时频表示具有集中度高,且无交叉干扰的特点,可以准确刻画信号的时频特征。

根据式(5),在距离徙动校正后, $|s_2(t_m, t')|$ 的峰值位于 $2(a_0 - R_c)/c$ 所对应的距离单元内,沿慢时间 t_m 轴抽取该距离单元内的信号,并利用估计的 \hat{a}_i 完成多普勒徙动初步补偿,可得:

$$s_d(t_m) = A_2 \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{i=0}^Q \frac{1}{i!} \varepsilon_i t_m^i \right] \tag{6}$$

式中 A_2 为信号幅度。该信号为受残差 $\varepsilon_i = (a_i - \hat{a}_i)$ 控制的多项式调频信号,其瞬时频率为:

$$IF(t_m) = -\frac{2}{\lambda} \sum_{i=1}^Q \frac{1}{(i-1)!} \varepsilon_i t_m^{i-1} \tag{7}$$

$s_d(t_m)$ 的多项式调频小波变换为^[15-16]:

$$PCT_s(t'_m, f; p) = \int_{-\infty}^{\infty} s_d(\tau) \Phi_R(\tau; p) \Phi_s(t'_m, \tau; p) \times g_\sigma^*(\tau - t'_m) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \tag{8}$$

其中

$$\begin{cases} \kappa(t_m; p) = -\frac{2}{\lambda} \sum_{i=2}^Q \frac{1}{(i-1)!} c_i t_m^{i-1} \\ \Phi_R(\tau; p) = \exp \left[-j \int_{-\infty}^{\infty} \kappa_p(\tau) d\tau \right] \\ \Phi_s(t'_m, \tau; p) = \exp [j\tau \kappa_p(t'_m)] \end{cases}$$

式中: $\kappa(t_m; p), \Phi_R(\tau; p), \Phi_s(t'_m, \tau; p)$ 分别为受参数 $p = \{c_2, c_3, \dots, c_Q\}$ 控制的核函数、频率旋转算子和频率平移算子; $g_\sigma(\tau - t'_m)$ 为中心位于 t'_m 、时宽为 σ 的高斯窗函数。当变换核参数 $p = \{0, 0, \dots, 0\}$ 时,式(8)退化为短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT); 当 $p = \{\varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_Q\}$ 时,可获得的时频表示集中度最高,频率分辨力为 $1/\sigma$ 。

由于首次进行 PCT 时,缺少关于残差 ε_i 的信息,因此首先设置 $p = \{0, 0, \dots, 0\}$, 执行短时傅里叶变换,利用提取的时频脊特征估计 ε_i , 再根据时频特征逼近原理^[16], 利用 ε_i 的估计值 $\hat{\varepsilon}_i$ 更新核参数 p , 迭代提升 $PCT_s(t'_m, f; p)$ 的时频集中度和 ε_i 的估计精确度。修正相应运动参数估计值为:

$$\hat{a}'_i = \hat{\varepsilon}_i + \hat{a}_i, \quad i = 1, 2, \dots, Q \tag{9}$$

利用 \hat{a}'_i 替换式(4)中的 \hat{a}_i , 重新构造距离校正函数 $H_r(t_m, f_i)$, 并再次进行距离徙动校正,记第二次距离校正后的信号为 $s'_2(t_m, t')$, 更新 a_0 的估计为:

$$\hat{a}'_0 = \frac{c}{2} \arg \max_{t'} \left[\sum_{m=0}^{M-1} |s'_2(t_m, t')| \right] + R_c \tag{10}$$

1.4 处理流程

根据前几节的描述,本方法的详细处理流程可概括为图 1, 图中的公式为相关步骤的输出。

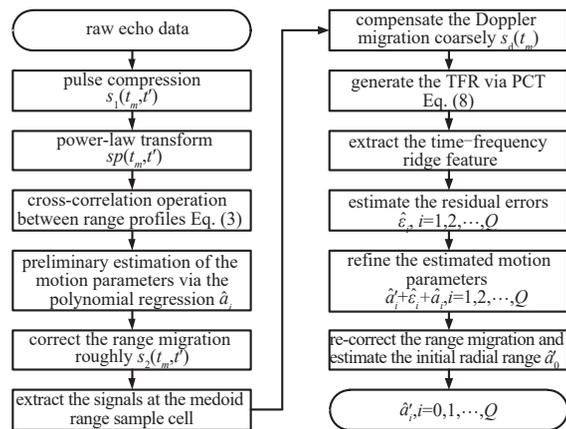


Fig.1 Detailed flowchart of the proposed method
图 1 详细流程框图

2 数值实验

2.1 关键参数设置

假设雷达和目标的关键参数见表 1, 其中速度、加速度、第二加速度等以远离雷达方向为正。为抑制脉冲压

缩输出旁瓣，采用 Hamming 窗进行失配处理，其信噪比损失约为 1.34 dB，加宽系数约为 1.47^[11]。根据表 1，其瑞利距离分辨力、距离采样单元分别为 5 m、1.25 m；在 Hamming 窗失配处理后，其脉压处理增益、距离分辨力分别约为 26 dB、7.35 m；雷达无模糊距离为 75 km，无模糊速度为 100 m/s，积累时间为 0.512 s。

表 1 雷达和目标的关键参数

Table 1 Key parameters of radar and target

parameter	value	parameter	value
carrier frequency	3 GHz	integration pulse number	1 024
pulse duration	20 μs	radar's position/m	(0, 0, 0)
pulse bandwidth	30 MHz	target initial position/km	(30, 0, 0)
pulse compression mismatch window type	Hamming	target radial velocity/(m·s ⁻¹)	(-1 021.5, 0, 0)
sampling frequency	120 MHz	target radial acceleration/(m·s ⁻²)	(-49.03, 0, 0)
pulse repetition frequency	2 kHz	target radial jerk/(m·s ⁻³)	(-100, 0, 0)

2.2 距离徙动校正

为了清晰地观测雷达回波能量的分布，减少噪声的影响，图 2 在较强的信噪比((Signal-to-Noise Ratio, SNR (作为变量出现时用 R_{SN} 表示))条件下($R_{SN}=0$ dB))给出了距离徙动校正前后的距离像(Range Profile, RP)。其中，图 2(a)为脉冲压缩后、距离徙动初步补偿前的距离像，在观测时间内，目标与雷达间距由 30.00 km 变化为 29.47 km，跨越了 72 个距离分辨单元，424 个距离采样单元，回波能量分布在不同的距离单元内，发生了严重的距离徙动；图 2(b)为雷达回波能量在距离频率—脉冲频率(f_r-f_d)域分布，由于目标的机动，其回波能量分布在不同的脉冲频率单元(多普勒分辨单元)内，并且目标的变加速运动使得频谱扭曲变形，即发生了严重的多普勒徙动，广泛采用的 MTD 方法将难以有效聚焦回波能量；利用鲁棒互相关算法估计的运动参数，完成距离徙动校正后的距离像如图 2(c)所示，不同脉冲的距离像包络峰值位于同一距离分辨单元内，距离徙动得到有效校正。

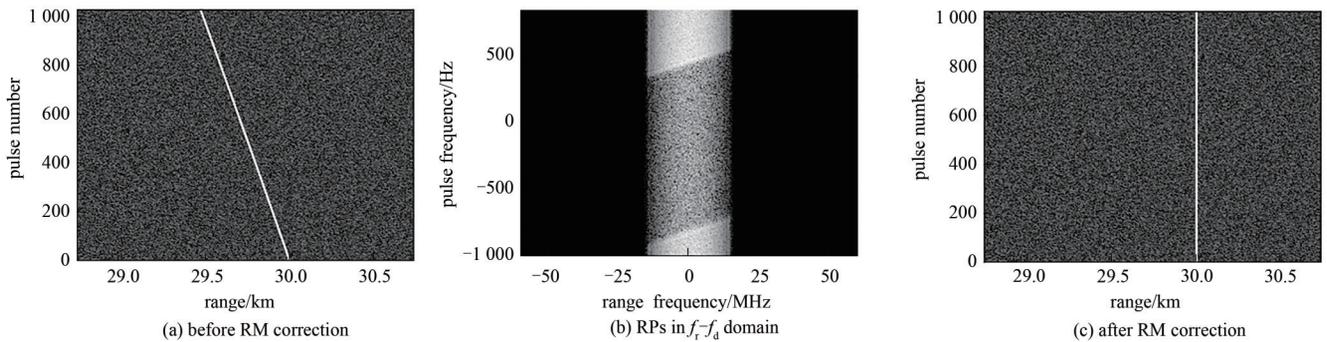


Fig.2 Range profiles ($R_{SN}=0$ dB)

图 2 距离像($R_{SN}=0$ dB)

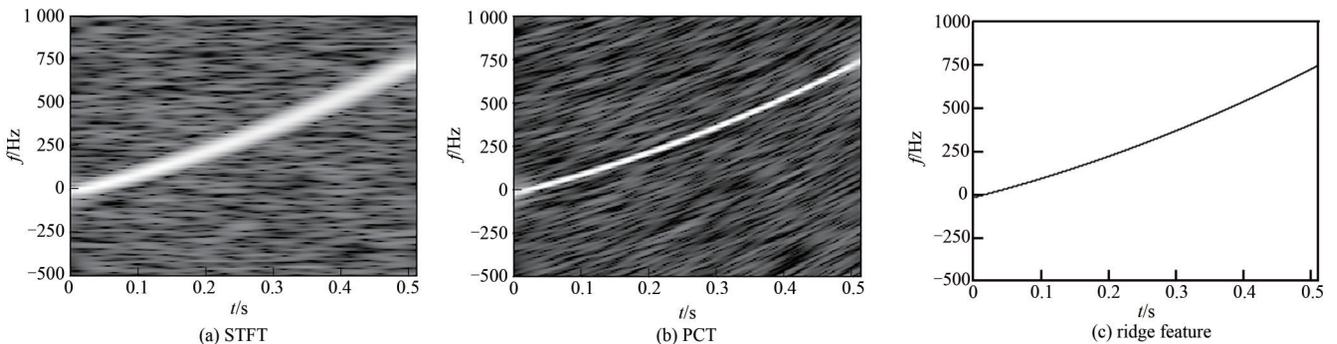


Fig.3 Time-frequency representation and time-frequency ridge extraction

图 3 时频表示与时频脊特征提取($R_{SN}=-23$ dB)

2.3 时频脊特征提取

当回波输入信噪比较低时，只利用鲁棒互相关法估计的运动参数 \hat{a}_i 不足以完全补偿多普勒徙动。在 1.3 节中给出了利用 PCT 提取时频脊特征，估计运动残差，最后修正目标运动参数的方法。为方便直接观察加速度、

第二加速度的影响,多普勒初步补偿可仅利用RCCF估计的距离偏置项和速度项。在较低输入信噪比条件下($R_{SN}=-23$ dB),对多普勒徙动初步补偿后的信号 $s_d(t_m)$,采用STFT、二次迭代PCT产生的时频表示分别如图3(a)、图3(b)所示,图3(c)为从图3(b)中提取的时频脊特征。由图可见,相比于STFT,经二次迭代PCT后产生的时频表示的频率分辨率和时频集中度得到较大的提升,提取的时频脊特征可准确刻画信号的时频变化轨迹。

2.4 目标运动参数估计精确度分析

为了提升距离像包络互相关算法(Cross-Correlation Function, CCF)对高速机动目标运动参数估计精确度,本文采取的关键措施有:将CCF采用的最小二乘拟合修正为鲁棒多项式回归(RCCF);利用幂率变换算子抑制噪声、增强信号(P8-RCCF);最后采用PCT刻画高度时变非平稳信号,提升运动参数估计精确度(P8-RCCF-PCT)。需要指出的是,本实验考虑变加速运动目标,式(2)中的多项式阶次 $Q=3$,但是在运动参数估计中需要根据测量数据确定回归多项式的阶次,其可通过比较不同阶次的估计值与测量值间的均方误差^[13]进行确定。

为比较各项措施的效果,通过蒙特卡洛试验(对每个SNR进行100次测量)给出了在不同信噪比条件下,CCF,RCCF,P8-RCCF,P8-RCCF-PCT的均方根误差曲线,如图4所示。表2给出不同方法的信噪比门限和在 $R_{SN}=-14$ dB(对应于CCF的信噪比门限)时各自的运动参数测量均方根误差。由图4和表2可见,本文提出的方法(P8-RCCF-PCT)与基于距离像包络互相关CCF的方法相比,信噪比门限降低约9 dB,当 $R_{SN}=-14$ dB时,其距离、速度、加速度和第二加速度的精确度分别提升约0.76 dB,16.99 dB,23.94 dB,25.94 dB。

表2 信噪比门限与均方根误差
Table2 SNR threshold and RMSE

methods	SNR threshold/dB	$R_{SN}=-14$ dB							
		RMSE of \hat{R}_0		RMSE of \hat{v}_0		RMSE of \hat{a}_0		RMSE of \hat{j}_0	
		m	dB	m/s	dB	m/s ²	dB	m/s ³	dB
CCF	-14	0.25	-6.02	1.50	1.76	14.87	11.72	58.88	17.70
RCCF	-16	0.25	-6.02	1.41	1.49	13.69	11.36	54.03	17.33
P8-RCCF	-22	0.21	-6.78	1.17	0.68	10.53	10.22	40.15	16.04
P8-RCCF-PCT	-23	0.21	-6.78	0.03	-15.23	0.06	-12.22	0.15	-8.24

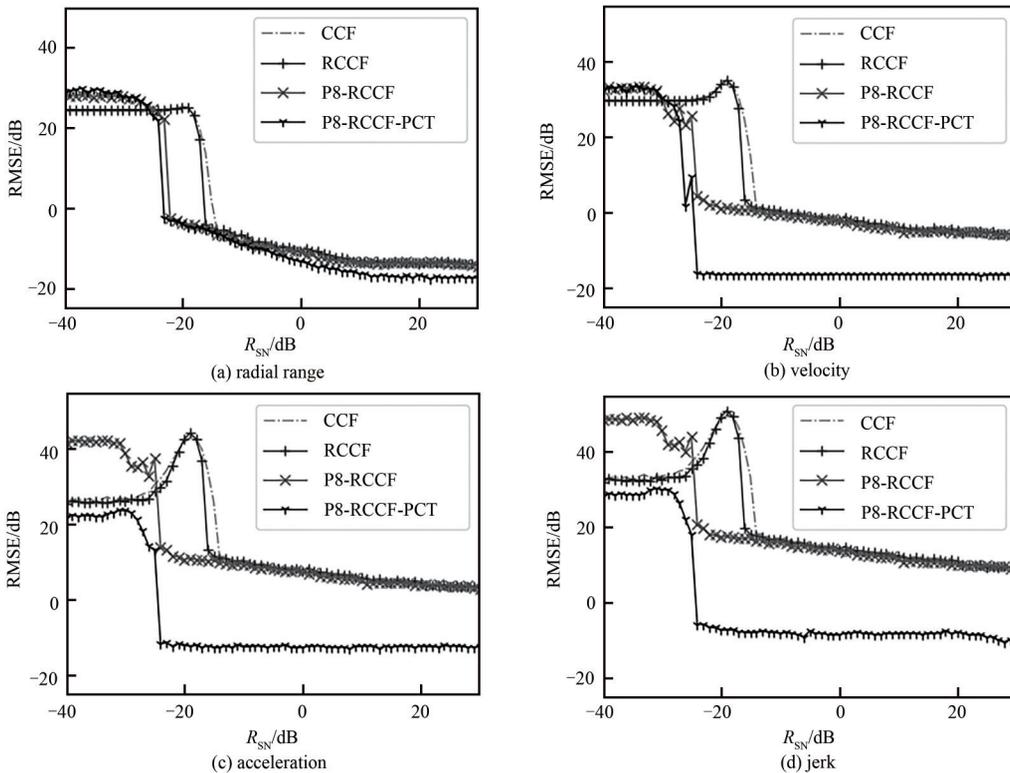


Fig.4 Root mean square errors of the estimated motion parameters of the target
图4 目标运动参数估计均方根误差

3 结论

对存在高阶机动的高速目标,本文基于鲁棒互相关和多项式调频小波变换,提出了一种高速机动目标运动参数估计方法。该方法不需要复杂的多普勒解模糊和高维运动参数空间搜索,且不存在交叉项干扰,可以准确刻画信号的时频特征,获得较高的参数测量精确度。通过数值实验表明,本文提出的方法与距离像包络互相关方法相比信噪比门限可降低 9 dB,对目标距离、速度、加速度和第二加速度的估计精确度分别提升约 0.76 dB, 16.99 dB, 23.94 dB, 25.94 dB,对提升雷达检测高速机动弱目标的能力有积极意义。

参考文献:

- [1] WANG H, YI J, WAN X, et al. A fast coherent integration algorithm for maneuvering target detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12):4560–4570.
- [2] SUN J, ZHANG X, LEI P, et al. Radon-S transform for hypersonic maneuvering target detection[J]. Multidim Syst Sign Process, 2019(30):17–38.
- [3] LI X, SUN Z, YI W, et al. Radar detection and parameter estimation of high-speed target based on MART-LVT[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(4):1478–1486.
- [4] 孙艳丽, 陈小龙, 柳叶. 雷达动目标变换域相参积累检测及性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(3):457–461. (SUN Yanli, CHEN Xiaolong, LIU Ye. Detection and performance analysis of radar coherent integration for moving target in transform domain[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(3):457–461.)
- [5] ITOH T, SUEDA H, WATANABE Y. Motion compensation for ISAR via centroid tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3):1191–1197.
- [6] LI Xi, LIU Guosui, NI Jinlin. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(4):1240–1252.
- [7] KÜÇÜKKILIÇ T. ISAR imaging and motion compensation[D]. Turkey: Middle East Technical University, 2006.
- [8] XU J, XIA X G, PENG S B, et al. Radar maneuvering target motion estimation based on generalized radon-Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12):6190–6201.
- [9] KONG L, LI X, CUI G, et al. Coherent integration algorithm for a maneuvering target with high-order range migration[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2015, 63(17):4474–4486.
- [10] LI X, CUI G, KONG L, et al. Fast non-searching method for maneuvering target detection and motion parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(9):2232–2244.
- [11] RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2005.
- [12] THEODORIDIS S. Machine learning a Bayesian and optimization perspective[M]. San Diego, CA, USA: Elsevier Ltd, 2015.
- [13] CHEN V C, MARTORELLA M. Inverse synthetic aperture radar imaging[M]. Edison, NJ: SciTech Publishing, 2014.
- [14] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2010.
- [15] PENG Z K, MENG G, CHU F L, et al. Polynomial chirplet transform with application to instantaneous frequency estimation[J]. IEEE Transactions on Measurement and Instrumentation, 2011, 60(9):3222–3229.
- [16] YANG Y, PENG Z K, DONG X J, et al. General parameterized time-frequency transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(11):2751–2764.

作者简介:

林 华(1977-), 男, 福建省浦城县人, 在读博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理. email: linhua9068@sohu.com.

张 海(1968-), 男, 合肥市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统及其信号处理.

曾 超(1968-), 男, 贵阳市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为复杂电子系统分析、综合与仿真.

江 舸(1982-), 男, 四川省乐山市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为雷达系统及其信号处理.